

УДК 621.7.043

*Р. Г. ПУЗЫРЬ, Р. В. ЛЕВЧЕНКО, Ю. Б. СИРА, С. Н. ЛЕЛЮХ***ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ РАЗДАЧЕ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДНИКОВ**

Приводятся результаты конечно-элементного моделирования процесса раздачи трубной заготовки коническим пуансоном. Показано, что раздача получила широкое распространение в инженерной практике и предназначена для увеличения диаметра любой части цилиндрической заготовки, применяется для приращения диаметра концов труб, которые выступают в роли соединительных элементов топливной, теплообменной и воздушной трубопроводных систем автомобилей, судов и сельскохозяйственной техники. Приведены эмпирические критерии потери устойчивости заготовки с образованием поперечной кольцевой складки. Процесс моделировался согласно данным критериям для визуализации потери устойчивости и проверки работоспособности данной модели. Было сделано предположение, что потеря устойчивости заготовки во время раздачи вблизи участка свободного изгиба объясняется действием изгибающих моментов на границе этого участка, способствующих увеличению диаметра заготовки. На их величину значительное влияние оказывает геометрия инструмента (угол конуса пуансона), условия трения на контактном участке между инструментом и заготовкой и геометрические характеристики оболочки. Также проводились измерения зоны начала возникновения гофры и результаты сравнивались с существующими методами расчета. Данные исследования показали не достаточную правомерность аналитической модели для прогнозирования складкообразования. Установлено, что применяемые в инженерной практике критерии потери устойчивости второго вида удовлетворительно согласуются с результатами данного моделирования, а значит задача в такой постановке и численный расчет может быть вполне адаптирован для анализа напряженно-деформированного состояния аналогичных процессов формообразования. Вопрос о преимущественном влиянии изгибающего момента, действующего в меридиональном направлении, на возникновение поперечной гофры остается открытым и требует дальнейших исследований.

Ключевые слова: раздача, цилиндрическая заготовка, пластическая деформация, увеличение диаметра, моделирование, складкообразование.

*Р. Г. ПУЗИР, Р. В. ЛЕВЧЕНКО, Ю. Б. СИРА, С. М. ЛЕЛЮХ***ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ТРУБНОЇ ЗАГОТОВКИ ПРИ РОЗДАВАННІ З'ЄДНУВАЛЬНИХ ПЕРЕХОДІВ**

Проводяться результати скінечно-елементного моделювання процесу роздавання трубної заготовки конічним пуансоном. Показано, що роздача отримала широке розповсюдження в інженерній практиці та призначена для збільшення діаметру будь-якої частини циліндричної заготовки, використовується для прирощення діаметру кінців труб, які виступають у ролі з'єднувальних елементів паливної, паливо обмінної та повітряної трубопроводних систем автомобілів, судин та сільськогосподарської техніки. Приведені емпіричні критерії втрати стійкості заготовки з утворенням поперечної кільцевої складки. Процес моделювався згідно даним критеріям для візуалізації втрати стійкості та перевірки працездатності даної моделі. Було зроблене припущення, що втрата стійкості заготовки під час роздачі поблизу ділянки вільного згину, пояснюється дією згинаючих моментів на кордоні цієї ділянки, що сприяє збільшенню діаметру заготовки. На їх величину значно впливає геометрія інструменту (кут конусу пуансона), умови тертя на контактній ділянці між інструментом та заготовкою та геометричні характеристики оболонки. Також проводилися вимірювання зони початку виникнення гофри та результати порівнювалися з існуючими методами розрахунку. Дані дослідження показали не достатню правомірність аналітичної моделі для прогнозування складкоутворення. Встановлено, що критерії втрати стійкості другого виду, що використовуються в інженерній практиці, задовільно узгоджуються з результатами даного моделювання, а значить задача в такій постановці та чисельний розрахунок можуть бути адаптовані для аналізу напружено-деформованого стану аналогічних процесів формоутворення. Питання про переваги впливу згинаючого моменту, що діє в меридіональному напрямку, на виникнення поперечної гофри залишається відкритим та потребує подальших досліджень.

Ключові слова: роздавання, циліндрична заготовка, пластична деформація, збільшення діаметру, моделювання, складкоутворення.

*R. PUZYR, R. LEVCHENKO, Y. SIRAYA, O. PEDUN***NUMERICAL SIMULATION OF LOSS SUSTAINABILITY OF PIPE PROCESSING AT THE DISTRIBUTION OF CONNECTING ADAPTERS**

Results of finite-element simulation of process of pipe blank distribution with conical punch are given. It has been shown that distribution has become widespread in engineering practice and is intended to increase the diameter of any part of the cylindrical blank, is used to increment the diameter of pipe ends, which act as connecting elements of fuel, heat exchange and air pipeline systems of automobiles, ships and agricultural machinery. Empirical criteria of billet stability loss with formation of transverse circular fold are given. The process was modeled according to these criteria to visualize the loss of stability and verify the operability of the model. It has been suggested that the loss of stability of the workpiece during dispensing in the vicinity of the free bend portion is due to the action of bending moments at the boundary of that portion contributing to the increase in the diameter of the workpiece. Their magnitude is significantly influenced by tool geometry (punch cone angle), friction conditions at the contact area between the tool and workpiece, and shell geometric characteristics. There were also measurements of the area where the corrugation began and the results were compared with existing calculation methods. These studies showed insufficient validity of the analytical model for prediction of folding formation. It has been established that the stability loss criteria of the second type used in engineering practice are satisfactorily consistent with the results of this simulation, and therefore the task in such a setting and numerical calculation can be quite adapted for analysis of stress-deformed state of similar forming processes. The question of the advantageous effect of the bending moment acting in the meridian direction on the occurrence of the transverse corrugation remains open and requires further research.

Key words: Distribution, cylindrical blank, plastic deformation, diameter increase, simulation, folding.

Введение. Раздача, как процесс холодной листовой штамповки, получила широкое распространение в инженерной практике и предназначена для увеличения диаметра любой части цилиндрической заготовки. Однако, в основном ее

применяют для приращения диаметра концов труб, которые выступают в роли соединительных элементов топливной, теплообменной и воздушной трубопроводных систем автомобилей, судов и сельскохозяйственной техники. В качестве

дополнительного перехода при профилировании стальных ободьев колес, изготовлении оборудования бытового назначения, транспортных конвейерных систем сыпучих, штучных и жидких продуктов, для изготовления баллонов, емкостей, сепараторов нефтехимической и пищевой промышленности [1 – 5]. При этом в большинстве технологических процессов используется инструментальная оснастка, которая характеризуется своей простотой и доступностью в материальном оформлении [5, 6].

Увеличение диаметра центральной части трубной заготовки возможно путем применения специальной оснастки и способов, основанных на динамической штамповке (использование энергии взрыва, магнитно-импульсная штамповка и электрогидроштамповка), а также на штамповке деформируемыми средами (свинец, олово, алюминий, гранулированный материал, жидкость, резина полиуретан и т.д.) [6, 7 – 11]. Данные процессы раздачи используются в единичном и мелкосерийном производстве и не находят широкого применения в более крупных масштабах из-за длительности подготовительных работ (штамповка взрывом), необходимости в специальных навыках персонала (штамповка взрывом, магнитно-импульсная штамповка, электрогидроштамповка), сложности и громоздкости оборудования (магнитно-импульсная штамповка, электрогидроштамповка, штамповка жидкостью), наличия больших производственных площадей (штамповка взрывом), быстрого износа оснастки (штамповка резиной и полиуретаном), а также не возможности создания больших удельных давлений (штамповка деформируемыми средами – свинец, олово, алюминий).

Цель работы. Определить конечно-элементным моделированием зону потери устойчивости трубной заготовки в процессе раздачи, выявить наиболее значимые факторы процесса, устраняющие данное явление и сравнить полученные результаты с существующими аналитическими решениями.

Изложение основного материала. Конечно-элементное моделирование проводилось в программном комплексе Simulia Abaqus – student edition, который предоставляется инженеринговой компанией «ТЕСИС» в качестве ознакомительного и отличается от профессиональных версий ограниченным количеством узлов конечно-элементной модели. Заготовка представляла собой цилиндр с толщиной стенки 3,0 мм, диаметром – 80 мм и высотой – 250 мм. Геометрические размеры пуансона: высота – 50 мм, диаметр нижнего основания – 74 мм, верхнего – 140 мм, угол наклона образующей усеченного конуса составил 34°. Заготовка устанавливалась вертикально, а для имитации жесткого горизонтального основания к нижнему торцу заготовки прикладывали граничное условие «encastre» – т.е. ограничение смещений и поворотов по всем степеням свободы. Пуансон восстанавливался сверху на цилиндр, до совмещения внутренней поверхности торца заготовки с торцом усеченного конуса. Задавали тип взаимодействия между внутренними стенками цилиндра и внешними

инструмента методом механических ограничений в виде кинематических контактных с конечной формулировкой скольжения. Свойства контакта определяли, как нормальные и тангенциальные с коэффициентом трения равным 0,25. Т.е. моделировали, что на поверхность заготовки и пуансона нанесен слой жидкой смазки. Инструмент ограничивали по всем степеням свободы, кроме смещения вдоль оси заготовки, что обеспечило необходимое давление для создания пластических деформаций. Граничным условием, необходимым для раздачи, также являлась возможность смещений и поворотов верхнего торца заготовки и ее цилиндрической поверхности по всем направлениям, кроме поворота вокруг собственной оси. Задача осесимметричная, поэтому рассматривали половину заготовки и, соответственно, прямолинейные стороны заготовки закрепили также от смещения в направлении отсеченной части цилиндра, гарантируя тем самым совместность деформаций.

Задачу решали в 3D постановке, поэтому заготовку назначили деформированным твердым телом, которое получено выдавливанием полукольца на глубину 250 мм. Инструмент представлял собой твердое недеформируемое тело в виде оболочки, созданное вращением усеченного конуса на угол 180°.

Материал заготовки обладал следующими механическими характеристиками: плотность – 7800 кг/м³, предел текучести – 230 МПа, предел прочности – 320 МПа, коэффициент Пуассона – 0,28, упрочнение материала заготовки аппроксимировалось зависимостью – $\sigma_{0,2} = 230 + 3,46\varepsilon^{0,6}$ [12, 13]. Металл, используемый в листовой штамповке имеет начальную анизотропию механических свойств, которая оказывает, в основном, негативное влияние на процесс деформации и устойчивость формообразования. Поэтому, принимали допущение, что материал заготовки обладает цилиндрической начальной анизотропией, приобретенная в процессе деформации анизотропия не учитывается, а его упрочнение согласуется с изотропной гипотезой. Материал несжимаем, а эффект Баушингера не учитывается. Цилиндрическую анизотропию задавали инженерными константами в направлении главных осей анизотропии – $E_x=196$ ГПа; $E_z=196$ ГПа – по толщине металла, $E_y=270$ ГПа – в направлении оси; $G_x= G_z= G_y=78$ ГПа [14, 15].

Генерирование сетки конечных элементов проводилось в автоматическом режиме программы, где из предложенных методов построения для инструмента был выбран свободный, с твердотельным четырехугольным типом элемента R3D4, который содержится в стандартном наборе модуля. Сетку для заготовки формировали линейным порядком построения из 8 узловых линейных прямоугольных элементов типа C3D8R, содержащихся в стандартной библиотеке и работающих во всех направлениях по объему материала. Сборка модели в начальном положении пуансона с сеткой элементов и координатными осями показана на рис. 1.

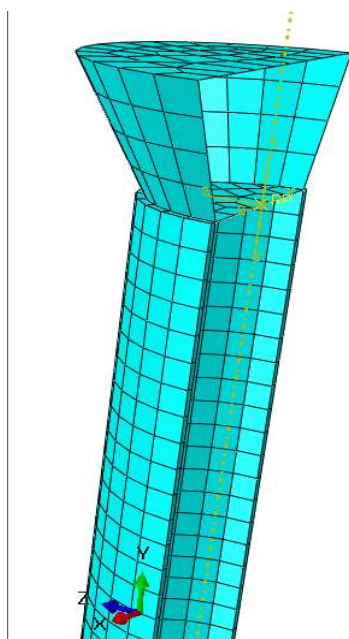


Рис. 1 – Конечно-элементная сборка заготовки и пуансона на начальном этапе моделирования процесса раздачи

Для того, чтобы пуансон в процессе вертикального перемещения опустился на всю высоту, равную 50 мм, запланировали время счета 300 сек., со скоростью движения инструмента 0,3 мм/сек. Это даст возможность получить коэффициент раздачи $k_p=1,75$.

Обсуждение результатов. Основным критерием, на котором основываются большинство технологических процессов раздачи, является эмпирический критерий устойчивости Аверкиева Ю.А.

$\frac{s_0}{D_0} 100 > 2.5 \dots 3.0$ [16, 17]. Заготовка с такими параметрами должна деформироваться с возникновением складки в поперечном направлении в зоне передачи усилия. Однако дополнительно к приведенному выше критерию необходимо учесть предельный коэффициент раздачи, который зависит от угла конусности пуансона, механических характеристик металла и коэффициента трения [16]

$$k_{pn} = \sqrt{\frac{2,2\varphi_y\sigma_m}{\sigma_s(1+\mu\operatorname{ctg}\alpha)(3-2\cos\alpha)}} + 1. \quad (1)$$

где σ_m – предел текучести металла;

$$\varphi_y = \frac{\sigma_{kp}}{\sigma_m};$$

σ_s – предел прочности металла;

σ_{kp} – критическое напряжение, вызывающее складкообразование;

α – угол конусности пуансона.

Для данных начальных условий эти требования выглядят следующим образом: $\frac{3}{80} 100 = 3,75$;

$$k_{pn} = \sqrt{\frac{2,2 \cdot 1 \cdot 230}{320 \cdot (1 + 0,25 \operatorname{ctg} 34)(3 - 2 \cos 34)}} + 1 = 1,363.$$

Таким образом, заготовка для моделирования подбиралась так, чтобы в процессе деформации возникла складка в зоне передачи усилия (рис. 2).

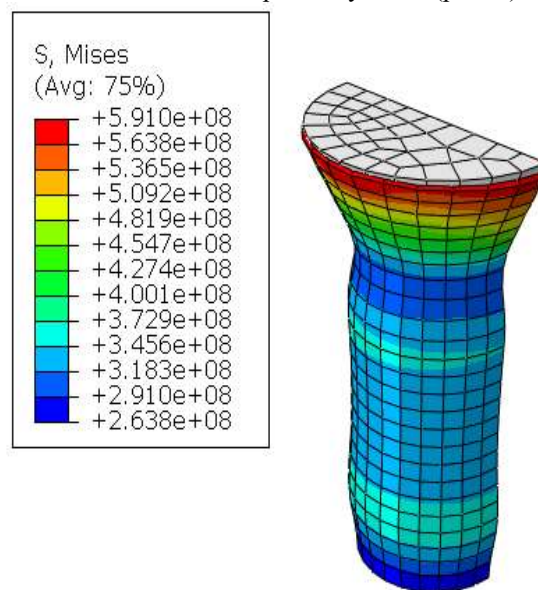


Рис. 2 – Раздача переходника с образованием поперечных складок

Однако на рис. 2 показана конечная стадия процесса, где коэффициент раздачи равен $k_p=1,75$. Предельные коэффициенты раздачи для данных геометрических характеристик пуансона и заготовки с заданными механическими свойствами материала рекомендуется выбирать в пределах до $k_p=1,43$ [18]. Что практически совпадает с выше приведенными расчетами. На рис. 3 изображено положение пуансона на 165 секунде счета, что соответствует его внедрению в заготовку на глубину 25 мм. При этом визуально можно убедиться о формировании места будущего гофра. Здесь коэффициент раздачи составил $k_p=1,33$, т. е. практически равный предельному, рассчитанному по зависимости (1).

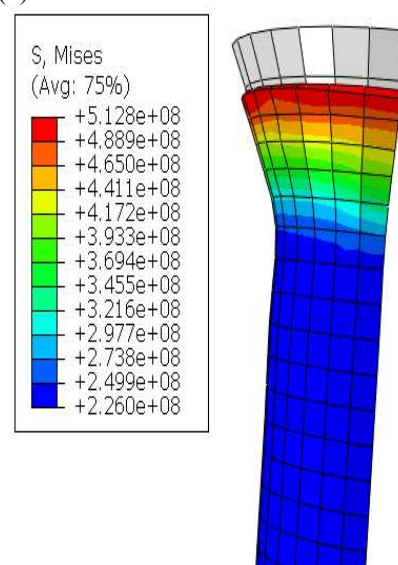


Рис. 3 – Внедрение пуансона в заготовку на промежуточном этапе расчета

Также, ранее были получены зависимости для определения границы возникновения гофра при раздаче коническим пуансоном [17, 19–22]. Решения основывались на положении технической теории оболочек вращения, ее допущениях и осесимметричности процесса деформирования:

$$a = \ln \frac{1}{\beta} \left(\frac{(R-r)E}{r\sigma_s \left(1 - \frac{3}{2} \frac{l^2}{r^2} \right)} - 1 \right), \quad (2)$$

где r – радиус заготовки,

$$\beta = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2rs}};$$

R – радиус инструмента;

E – модуль Юнга;

l – протяженность конического участка заготовки.

Для принятых условий деформирования значение данного параметра равно – (рис. 4).

$$a = \ln \frac{\sqrt{2 \cdot 0,04 \cdot 0,003}}{\sqrt{3}} \left(\frac{(0,053 - 0,04) 210 \cdot 10^9}{0,04 \cdot 210 \cdot 10^6 \left(1 - \frac{3}{2} \frac{0,03^2}{0,04^2} \right)} - 1 \right) = 9,8 \text{ мм}$$

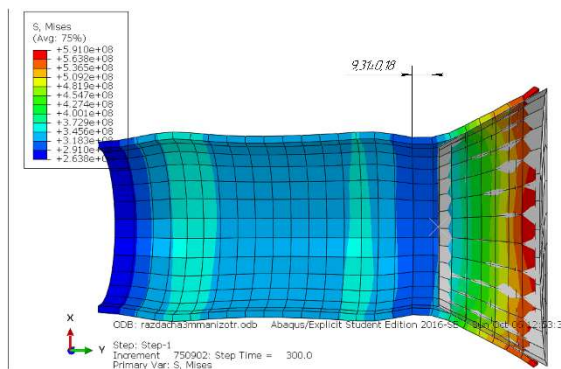


Рис. 4 – Значение параметра a на конечно-элементной сборке

Приведенный пример показывает практически точное совпадение результатов расчета по зависимости (2) и конечно-элементной модели. Это говорит об адекватности формулы (2) и правильности принятых допущений и гипотез при ее формировании. Основным допущением здесь было влияние изгибающего момента на потерю устойчивости с образованием гофра. Момент, действующий на участке свободного изгиба, оказывает влияние на возникновение поперечной складки, однако моментная нагрузка носит быстро затухающий характер [17, 23 – 26]. Однако, эта формула не дает пояснений об природе появления второго гофра, который расположен у основания заготовки. (рис. 4, рис. 1). Если, как предположено вышеупомянутыми авторами, появление складки связано не только с критическим напряжением, равным пределу текучести материала заготовки, но и

изгибающим моментом, действующим в зоне свободного изгиба, то у основания данный момент отсутствует, так как зависит от множителя e^{-kx} . Этот множитель и определяет быстроту его затухания [17, 26, 27].

Выводы. Таким образом, в результате конечно-элементного моделирования процесса раздачи трубной заготовки установлено, что применяемые в инженерной практике критерии потери устойчивости второго вида удовлетворительно согласуются с результатами данного моделирования, а значит задача в такой постановке и численный расчет может быть вполне адаптирован для анализа напряженно-деформированного состояния аналогичных процессов формообразования. Вопрос о преимущественном влиянии изгибающего момента, действующего в меридиональном направлении, на возникновение поперечного гофра остается открытым и требует дальнейших исследований.

Список литературы

1. Бужилов А.Л. Разработка альтернативной технологии производства наружного элемента капсулы для заготовок пустотелых турбокомпрессорных валов из гранул. *Технология легких сплавов*, 2009. №2. – С. 57–62.
1. Puzyr, R., T. Haikova, J. Majernik, M. Karkova, J. Kmec. Experimental Study of the Process of Radial Rotation Profiling of Wheel Rims Resulting in Formation and Technological Flattening of the Corrugations. *Manufacturing Technology*, 2018. No 18 (1), pp. 106–111.
2. Мосьян Д. В., Драгобецкий В. В., Пузырь Р. Г. Определение потребного крутящего момента при радиально-ротационном профилировании ободьев колес. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КДПУ, 2008. Вип. 6 (53), частина 2. – С. 64–66.
3. Maslov A., Batsaikhan J., Puzyr R., Salenko Y. The determination of the parameters of a vibration machine for the internal compaction of concrete mixtures. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, Vol. 7, No. 4.3, – pp. 12–19.
4. Калужний В. Л., Запороженко А.С., Піманов В.В. Інтенсифікація технологій виготовлення виробу «Балон 180×184». *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2012. № 2 (31). – С. 136–140.
5. Шляпугин А.Г., Гречников Ф.В., Попов И.П., Хардин М. В. Разработка моделей формообразования листовых деталей летательных аппаратов с помощью современных программных средств: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – С. 66.
6. Savelov D., Dragobetsky V., Puzyr R., Markevych A. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, No. 2, pp. 67–75.
7. Савченко Н. Ф., Андилахай А.А. Совершенствование ремонтных работ крупногабаритных конструкций с использованием метода локальной штамповки. *Захист металургійних машин від поломок: зб. наукових праць*. Маріуполь: ПДТУ, 2014. Вип.16. – С. 104–108.
8. Савченко Н. Ф., Рубан Е.Н. Изготовление крупногабаритных деталей, емкостей и резервуаров. *Современное состояние использования импульсных источников энергии в промышленности: тез. докл.* Харьков: ХАИ, 2007. – С. 103–104.
9. Пилипенко О. В. Обжим и раздача трубных заготовок из анизотропных материалов. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2007. № 11. – С. 18–23.
10. Третьякова Е. И. Сосенушкин Е. Н. Яновская Е. А. Определение полей напряжений при пластическом деформировании элементов оболочек. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2010. № 1 (22). – С. 49–54.

11. Третьяков А. В., Трофимов Г. К., Гурьянова М. К. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании. Москва : Машиностроение, 1971. – С. 63.
12. Мовшович И. Я., Пузырь Р. Г. Расчет меридиональных напряжений на первой операции процесса радиально-ротационного профилирования ободьев колес. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2013. № 10. – С. 3–7.
13. Puzyr R., Kukhar V., Maslov A., Shchipkovskiy Y. The Development of the Method for the Calculation of the Shaping Force in the Production of Vehicle Wheel Rims. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, Vol. 7, No. 4.3, pp. 30–34.
14. Пузырь Р. Г. Моделирования витягивания цилиндричної деталі без притиску фланця заготовки з ізотропного та анізотропного металу. *Вісник Національного технічного університету*. Харків: ХПІ, 2019. № 1. – С. 58–66.
15. Аверкиев Ю. А., Аверкиев А. Ю. Технология холодной штамповки. М: Машиностроение, 1989. – С. 304.
16. Пузырь Р. Г., Тропко О. В., Черкашенко В. Ю. Влияние геометрических параметров цилиндрической заготовки на напряженно-деформированное состояние при раздаче коническими пуансонами. // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2012. № 4 (33). – С. 114–121.
17. Шофман Л. А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. М: Машиностроение, 1964. – С. 375.
18. Драгобецкий В. В., Левченко Р. В., Пузырь Р. Г. Анализ напряжения заготовки при радиально-ротационном способе получения ободьев колес с измененной схемой внешнего воздействия. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА, 2012. № 1 (30). – С. 146–149.
19. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. Н. Оценка приемов, увеличивающих степень деформации при вытяжке цилиндрических деталей без складкодержателя. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Сер.: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 36 (1258). – С. 5–9.
20. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г. Определение геометрических параметров листовой заготовки для вытяжки осесимметричных деталей, устраняющих потерю устойчивости фланца. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2013. № 2 (35). – С. 118–123.
21. Пузырь Р. Г. Определение поверхностной нагрузки, вызывающей пластическую деформацию цилиндрической заготовки. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2013. № 2 (35). – С. 99–105.
22. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Вакуленко Р. А. Вплив анізотропії і зміцнення металу на втрату стійкості фланця при витягуванні циліндричної деталі без складкоутримувача. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Сер.: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 31 (1307). – С. 3–7.
23. Arhat R., Puzyr R., Haikova T. & Markevych A. Theoretical investigations of the stressed state on the exchange rate of matrix at highly cylinder parts. *Physical & chemical geotechnologies*. Дніпро: НТУ «ДП», 2018, pp. 137–139.
24. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. Н., Гриценко Б. С. Учет влияния упрочнения на поле напряжений при профилировании и вытяжке листового металла. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Сер.: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 7 (1229). – С. 5–9.
25. Пузырь Р. Г., Дикая Л. Э. Определение зоны возможной потери устойчивости при раздаче цилиндрической заготовки коническим пуансоном с учетом упрочнения металла в процессе деформирования. *Матеріали Всеукраїнської науково – практичної конференції "Сучасні технології промислового комплексу", випуск 2*. Херсон: ХНТУ (факультет машинобудування), 2015. – С. 77–79.
26. Сосенушкин, Е. Н., Смолович И. Е., Яновская Е. А. Исследование процесса неравномерной раздачи трубных заготовок. *Збірник наукових праць / Вісник НТУ «ХПІ»: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ», 2012. № 47.

References (transliterated)

1. Buzhilov A. L. Razrabotka al'ternativnoj tekhnologii proizvodstva naruzhnogo elementa kapsuly dlya zagotovok pustotel'nykh turbokompressornykh valov iz granul. *Tekhnologiya legkikh spлавov*, 2009. No. 2. – P. 57–62.
2. Puzyr, R., T. Haikova, J. Majernik, M. Karkova, J. Kmec. Experimental Study of the Process of Radial Rotation Profiling of Wheel Rims Resulting in Formation and Technological Flattening of the Corrugations. *Manufacturing Technology*, 2018. No 18 (1), pp. 106–111.
3. Mos'pan D. V., Dragobekij V. V., Puzyr R. G. Opredelenie potrebnogo krutyashchego momenta pri radial'no-rotacionnom profilirovaniy obod'ev koles. *Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu imeni Mihajla Ostrogradsk'kogo*. Kremenchuk: KDPU, 2008. Vip. 6 (53), chastina 2. – P. 64–66.
4. Maslov A., Batsaikhan J., Puzyr R., Salenko Y. The determination of the parameters of a vibration machine for the internal compaction of concrete mixtures. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, Vol. 7, No. 4.3, pp. 12–19.
5. Kalyuzhnyj, V. L., Zaporozhchenko A. S., Pimanov V. V. Intensifikaciya tekhnologii vivotovlenniya virobu «Balon 180×184». *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnykh trudov*. Kramatorsk: DGMA, 2012. No 2 (31). – P. 136–140.
6. Shlyapugin A. G., Grechnikov F. V., Popov I. P., Hardin M. V. Razrabotka modelej formobrazovaniya listovykh detalей letatel'nykh apparatov s pomoshch'yu sovremennykh programmykh sredstv: ucheb. posobie. Samara: Izd-vo Samar, gos. aerokosm, un-ta, 2010. – P. 66.
7. Savelov D., Dragobetsky V., Puzyr R., Markevych A. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, No. 2, pp. 67–75.
8. Savchenko N. F., Andilaj A. A. Sovershenstvovanie remontnykh rabot krupnogabaritnykh konstrukcij s ispol'zovaniem metoda lokal'noj shtampovki. *Zahist metalurgijnykh mashin vid polomok: zb. nauchovykh prac'*. Mariupol': PDTU, 2014. Vip. 16. – P. 104–108.
9. Savchenko N. F., Ruban E. N. Izgotovlenie krupnogabaritnykh detalей, emkostej i rezervuarov. *Sovremennoe sostoyanie ispol'zovaniya impul'snykh istochnikov energii v promyshlennosti: tez. dokl. Har'kov: HAI*, 2007. – P. 103–104.
10. Pilipenko O. V. Obzhim i razdacha trubnykh zagotovok iz anizotropnykh materialov. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 2007. No 11. – P. 18–23.
11. Tret'yakova E. I., Sosenushkin E. N., Yanovskaya E. A. Opredelenie polej napryazhenii pri plasticheskom deformirovaniy elementov obolochek. *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnykh trudov*. Kramatorsk: DGMA, 2010. No 1 (22). – P. 49–54.
12. Tret'yakov A. V., Trofimov G. K., Gur'yanova M. K. Mekhanicheskie svoystva stalej i spлавov pri plasticheskom deformirovaniy. Moskva : Mashinostroenie, 1971. – P. 63.
13. Movshovich I. Ya., Puzyr R. G. Raschet meridional'nykh napryazhenij na pervoj operacii processa radial'no-rotacionnogo profilirovaniya obod'ev koles. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. *Obrabotka materialov davleniem*, 2013. No 10. – P. 3–7.
14. Puzyr R., Kukhar V., Maslov A., Shchipkovskiy Y. The Development of the Method for the Calculation of the Shaping Force in the Production of Vehicle Wheel Rims. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, Vol. 7, No. 4.3, pp. 30–34.
15. Puzir R. G. Modelyuvannya vityaguvannya cilindrichnoyi detalі bez pritisku flancya zagotovki z izotropnogo ta anizotropnogo metalu. *Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu*. Har'kiv: HPI, 2019. No 1. – P. 58–66.
16. Averkiv YU. A., Averkiv A. YU. Tekhnologiya holodnoj shtampovki. M: Mashinostroenie, 1989. S. 304.
17. Puzyr R. G., Trocko O. V., Cherkashchenko V. YU. Vliyanie geometricheskikh parametrov cilindricheskoj zagotovki na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie pri razdache konicheskimi puansonami. *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnykh trudov*. Kramatorsk: DGMA, 2012. No 4 (33). S. 114–121.
18. Shofman L. A. Teoriya i raschety processov holodnoj shtampovki. Moscow : Mashinostroenie, 1964. – P. 375.
19. Dragobekij V. V., Levchenko R. V., Puzyr R. G. Analiz napryazheniya zagotovki pri radial'no-rotacionnom sposobe polucheniya obod'ev koles s izmenennoy skhemoy vneshnego vozdeystviya. *Obrabotka materialov davleniem*. Kramatorsk: DGMA, 2012. No 1 (30). – P. 146–149.

20. Argat R. G., Puzyr R. G., Dolgih O. N. Ocenka priemov, uvelichivayushchih stepen' deformatsii pri vytyazhke cilindricheskikh detalej bez skladkoderzhatelya. Visnik Nac. tekhn. un-tu "HPI": zb. nauk. pr. Ser.: Innovacijni tekhnologii ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii. Harkiv: NTU "HPI", 2017. No 36 (1258). – P. 5–9.
21. Argat R. G., Puzyr R. G. Opredelenie geometricheskikh parametrov listovoj zagotovki dlya vytyazhki osesimmetrichnykh detalej, ustranyayushchih poteryu ustojchivosti flanca. Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnykh trudov. Kramatorsk: DGMA, 2013. No 2 (35). – P. 118–123.
22. Puzyr R.G. Opredelenie poverhnostnoj nagruzki, vyzyvayushchej plasticheskuyu deformatsiyu cilindricheskoy zagotovki. Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnykh trudov. Kramatorsk: DGMA, 2013. No 2 (35). – P. 99–105.
23. Argat R. G., Puzyr R. G., Vakulenko R. A. Vpliv anizotropii i zmicheniya metalu na vtratu stijkosti flancya pri vityaguvanni cilindrichnoi detali bez skladkoutrimuvacha. Visnik Nac. tekhn. un-tu "HPI": zb. nauk. pr. Ser.: Innovacijni tekhnologii ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii. Harkiv: NTU «HPI», 2018. No 31 (1307). – P. 3–7..
24. Arhat R., Puzyr R., Haikova T. & Markevych A. Theoretical investigations of the stressed state on the exchange rate of matrix at highly cylinder parts. *Physical & chemical geotechnologies*. Dnipro: NTU «DP», 2018, pp. 137–139.
25. Argat R. G., Puzyr R. G., Dolgih O. N., Gricenko B. S. Uchet vliyaniya uprochneniya na pole napryazhenij pri profilirovanii i vytyazhke listovogo metalla. Visnik Nac. tekhn. un-tu "HPI": zb. nauk. pr. Ser.: Innovacijni tekhnologii ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii. Harkiv: NTU "HPI", 2017. No 7 (1229). – P. 5–9.
26. Puzyr R.G., Dikaya L.E. Opredelenie zony vozmozhnoj poteri ustojchivosti pri razdache cilindricheskoy zagotovki konicheskimi puansonom s uchetoм uprochneniya metalla v processe deformirovaniya. Materiali Vseukrains'koї naukovo – praktichnoi konferencii "Suchasni tekhnologii promislavogo kompleksu", випуск 2. Herson: HNTU (fakul'tet mashinobuduvannya), 2015. – P. 77–79.
27. Sosnushkin, E.N., Smolovich I.E., Yanovskaya E.A. Issledovanie processa neravnomernoy razdachi trubnykh zagotovok. Zbirnik nauchovykh prac' // Visnik NTU "HPI" : Novi rishennya v suchasniy tekhnologiyah. Harkiv: NTU «HPI», 2012. No 47.

Надійшла (received) 02.11.2019

Сведения об авторах / Відомості про авторів / About the Authors

Пузырь Руслан Григорьевич (Пузыр Руслан Григорович, Puzyr Ruslan) – доктор технических наук, доцент, Колледж Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, доцент отделения машиностроения; г. Кременчуг, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9791-9002>; e-mail: puzyruslan@gmail.com.

Левченко Роман Владимирович (Левченко Роман Володимирович, Levchenko Roman) – кандидат технических наук, Колледж Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, г.Кременчуг, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2033-2905>; e-mail: lr78@i.ua

Сирая Юлия Борисовна (Сіра Юлія Борисівна, Siraya Yulia) – аспирант, Колледж Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, преподаватель; г.Кременчуг, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9247-4777>; e-mail: julia_sobol@i.ua

Лелюх Сергей Николаевич (Лелюх Сергій Миколайович, Lelukh Serhiy) – аспирант, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг, Украина.